

УДК 543.423: 543.08

## **МНОГОЭЛЕМЕНТНЫЕ ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ ДЕТЕКТОРЫ ИЗЛУЧЕНИЯ БОЛЬШОГО РАЗМЕРА ДЛЯ АТОМНО- ЭМИССИОННОГО СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА**

*В.А.Лабусов, В.И.Попов\*, А.В.Бехтерев\*, А.Н.Путьмаков, А.С.Пак  
Институт автоматики и электрометрии СО РАН  
Новосибирск*

*\*ООО «ВМК-Оптоэлектроника»,  
630090, Новосибирск, а/я 376  
labusov@vmk.ru*

Рассмотрены результаты работы по созданию твердотельных детекторов излучения большого размера, которые нашли широкое применение в атомно-эмиссионном спектральном анализе в составе анализаторов МАЭС. Разработаны специальная многоэлементная линейка фотодиодов и технология изготовления многокристальных сборок линеек. Кристаллы линеек в сборке размещены согласно требуемой поверхности фокусировки спектра и имеют постоянную температуру для стабилизации их фотоэлектрических параметров. Приведены характеристики линеек фотодиодов, а также основные типы и параметры многокристальных сборок для оснащения спектрографов и квантометров.

**Лабусов Владимир Александрович** – научный сотрудник Института автоматики и электрометрии СО РАН, технический директор ООО «ВМК-Оптоэлектроника».

**Область научных интересов** – оптоэлектроника, спектральное приборостроение.

**Автор 26 публикаций.**

**Попов Владимир Иванович** – генеральный директор ООО «ВМК-Оптоэлектроника».

**Область научных интересов** – оптоэлектроника, спектральное приборостроение.

**Автор 17 публикаций.**

**Бехтерев Алексей Владимирович** – руководитель отдела микроэлектроники ООО «ВМК-Оптоэлектроника».

**Область научных интересов** – микроэлектроника, оптоэлектроника.

**Автор 7 публикаций.**

**Путьмаков Анатолий Николаевич** – ведущий инженер Института автоматики и электрометрии СО РАН, руководитель отдела ввода в эксплуатацию и технического обслуживания ООО «ВМК-Оптоэлектроника».

**Область научных интересов** – микроэлектроника, спектральное приборостроение.

**Автор 20 публикаций.**

**Пак Александр Сергеевич** – инженер Института автоматики и электрометрии СО РАН.

**Область научных интересов** – микроэлектроника, оптоэлектроника.

**Автор одной публикации.**

В настоящее время с целью повышения количества фотодетекторов при регистрации спектров протяженностью в несколько десятков сантиметров производители оборудования для атомно-эмиссионного спектрального (АЭС) анализа применяют сборки из нескольких линейных многоэлементных твердотельных детекторов излучения (ТДИ). Так, на основе многолинейчатых сборок фирма Spectro (Германия) создала спектрометр Ciroc [1]. Фирмы "Морс" (г.Троицк, Московской области) [2], "Славна" (г.Заречный, Свердловской области), "Спектральная лаборатория" (г.Санкт-Петербург) и другие изготавливают многолинейчатые сборки для замены устаревших систем регистрации спектров в существующих спектральных приборах. В сборках применяют преимущественно линейки приемников с зарядовой связью (ПЗС) японских фирм Sony (ILX511 и ILX526A) и Toshiba (TCD1304AP). Конструкции сборок близки друг другу и определяются, в основном, длиной корпуса линеек ПЗС, которая примерно в 1,5 раза больше, чем длина фоточувствительной области. Для уменьшения размеров «мертвых» (нечувствительных к излучению) зон на стыках линеек производится разводка фрагментов спектра зеркалами. Недостатками линеек ПЗС ILX511 и ILX526A фирмы Sony является малый динамический диапазон ( $10^3$ ) и отсутствие чувствительности в ультрафиолетовой (УФ)

области спектра. Последний недостаток преодолевают путем нанесения люминофора на фоточувствительные области линеек ПЗС, однако это приводит к увеличению разброса чувствительности от ячейки к ячейке и к ухудшению разрешающей способности ТДИ. В свою очередь, линейки TCD1304AP фирмы Toshiba обладают хорошей чувствительностью в УФ области спектра, однако их динамический диапазон также ограничен значением  $10^3$ . Кроме того, они обладают большим блюмингом (растеканием фотогенерированного заряда на соседние ячейки). Блюминг приводит к аппаратурному уширению интенсивных спектральных линий и, соответственно, к невозможности использования в спектральном анализе находящихся рядом с ними слабых линий. Общим недостатком линеек ПЗС ILX511, ILX526A и TCD1304AP является малая высота фотоячеек – 0,2 мм.

Цель настоящей статьи – ознакомить специалистов с результатами работы авторов по созданию твердотельных детекторов излучения большого размера на основе многоэлементных линеек фотодиодов. Такие детекторы имеют ряд преимуществ перед линейками ПЗС: более высокие УФ чувствительность и динамический диапазон, отсутствие блюминга, большой сбор фотонов из-за увеличенной высоты фотоячеек, и широко применяются в настоящее время в анализаторах многоканальных атомно-эмиссионных спектров МАЭС [3].

Работа по созданию сборок ТДИ для решения задач АЭС анализа начата нами в 1992 году, когда промышленно выпускаемых систем регистрации спектров на их основе не существовало. Были, в первую очередь, приняты во внимание следующие факторы. Параметры полупроводниковых детекторов существенно зависят от температуры окружающей среды. Так, например, темновой ток фотодиодов при уменьшении температуры на  $10^\circ\text{C}$  падает в два раза. Поэтому при решении измерительных спектральных задач для компенсации темнового тока путем вычитания заранее измеренных опорных значений необходимо, чтобы ТДИ работал при постоянной температуре. В то же время для снижения порога чувствительности ТДИ необходимо уменьшать значение среднего квадратического отклонения (СКО) выходного сигнала при отсутствии излучения, что обеспечивается за счет снижения температуры кристалла ТДИ. Наилучшие результаты по охлаждению и стабилизации температуры ТДИ достигаются с помощью термоэлектрических холодильников Пельтье. При этом следует охлаж-

дать только полупроводниковый кристалл ТДИ, не охлаждая его корпус. Тогда электрическая мощность, требуемая для поддержания заданной температуры, может быть в несколько раз ниже, чем при охлаждении ТДИ в корпусе. Сборка из нескольких полупроводниковых кристаллов ТДИ в одном корпусе позволяет разместить их по поверхности фокусировки спектра с малыми размерами «мертвых» зон. Кристаллы устанавливают на монокристаллическом основании, обеспечивая выравнивание их температуры. Постоянная температура основания стабилизирует геометрические размеры многокристалльной сборки. В тепловом контакте с кристаллами ТДИ находится датчик температуры, входящий в состав системы стабилизации температуры. Корпус многокристалльной сборки герметичен и имеет входное окно для прохождения излучения. Многообразие спектральных приборов потребовало создания достаточно большого разнообразия корпусов.

Первый вариант многокристалльной сборки на основе линеек фотодиодов типа ЛФ-1024 (производства НПО «Восток», г. Новосибирск) был разработан в 1993 году для спектрографов PGS-2, ИСП-30, ДФС-458 и др. с целью замены фотопластинок [4]. Последующий опыт ее применения в АЭС анализе позволил выявить следующие недостатки: большой шаг размещения фотодиодов (25 мкм) и их недостаточная высота (150 мкм) по сравнению с шириной и высотой типичной спектральной линии, соответственно, а также малый динамический диапазон –  $10^3$ . В ряде случаев такие недостатки не позволяли пользователям получить результат анализа лучше, чем с помощью фотопластинок. Кроме того, выводы контактов линеек ЛФ-1024 на обе стороны кристаллов существенно усложняли конструкцию сборки.

Для улучшения характеристик и повышения технологичности многокристалльных сборок в 1995 году была разработана линейка фотодиодов типа БЛПП-369 с шагом размещения фотодиодов – 12,5 мкм, высотой фотодиода – 1 мм, динамическим диапазоном –  $10^4$  и спектральным диапазоном чувствительности – 160 - 1100 нм. Ее функциональная схема приведена на рис. 1. Фотоячейка представляет собой полностью доступный для воздействия излучения фотодиод, что позволяет получить достаточно высокую чувствительность линейки в УФ-диапазоне. Генерированные фотодиодами заряды накапливаются в закрытых от излучения интеграторах (МОП-емкостях), не изменяя напряжения смещения фотодиодов. По окончании накопления заряды

одновременно переносятся на входные емкости усилителей, после чего начинается новый цикл накопления зарядов в интеграторах и последовательное считывание сигналов усилителей на

выход линейки с помощью коммутатора. Все линейки в сборке начинают и заканчивают регистрацию спектра одновременно.

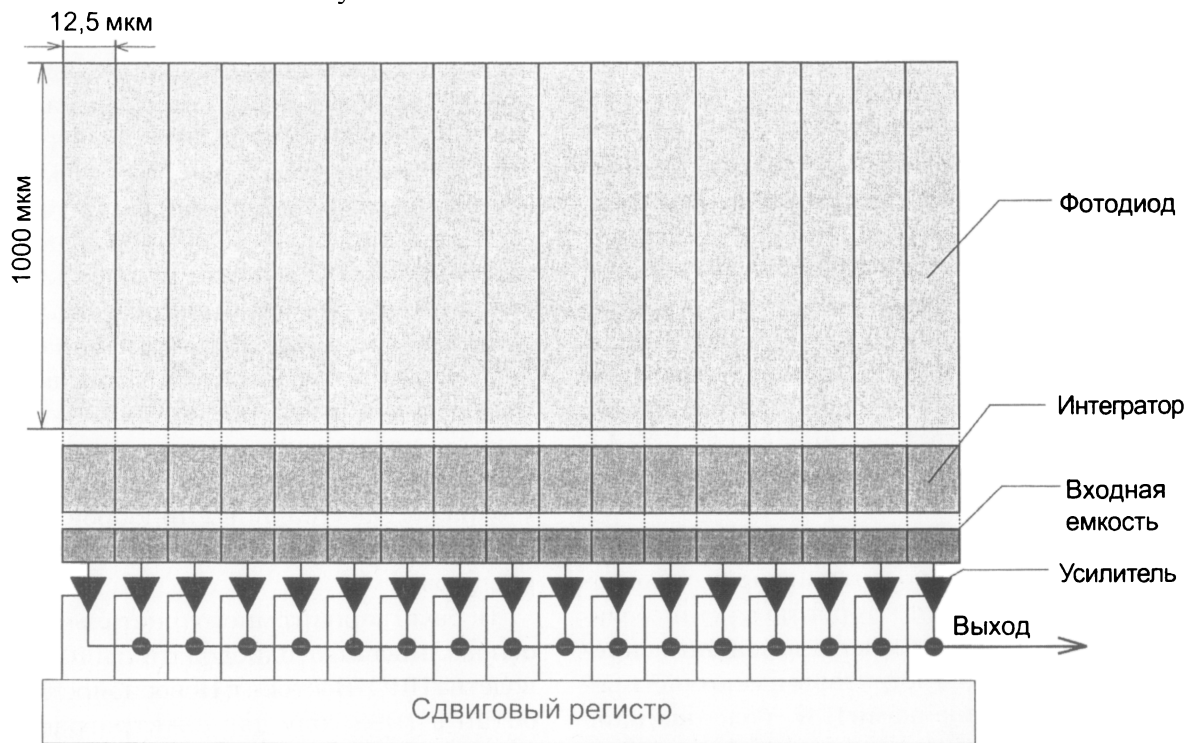


Рис.1. Функциональная схема фотодиодной линейки

Внешний вид фотодиодной линейки типа БЛПП-369 показан на рис.2. Линейка является интегральной микросхемой, выполнена в виде кремниевого кристалла длиной 33 мм, на поверхности которого сформированы фотодиоды, а также схема накопления и считывания сигналов. Расстояние fotocувствительной зоны до краев кристалла – 0,38 мм. Контакты линейки выведены на одну сторону кристалла. Для их соединения с электронной платой используются гибкие полиамидные шлейфы. Такое конструктивное исполнение линеек позволило создать многокристальные сборки для оснащения спектрографов и квантометров. Количество кристаллов (линеек) в сборке обычно составляет от 1 до 13. При этом размеры «мертвых» зон на стыках равны 0,76 мм, что составляет 2,4 % от регистрируемого спектра. Общее количество фотодиодов в многокристальной сборке может составлять 33000 и более, а полная длина светочувствительной зоны – превышать 40 см. Важно отметить, что все кристаллы устанавливаются на монолитном основании в процессе изготовления сборок. При этом точность изготовления таких оснований современными металлообрабатывающими станками достаточна для обеспечения требуемой точности установки отдельных кристаллов. При-

менение полиамидного шлейфа и односторонность контактов на кристалле позволили разместить линейки фотодиодов по поверхностям различной кривизны и в несколько рядов.

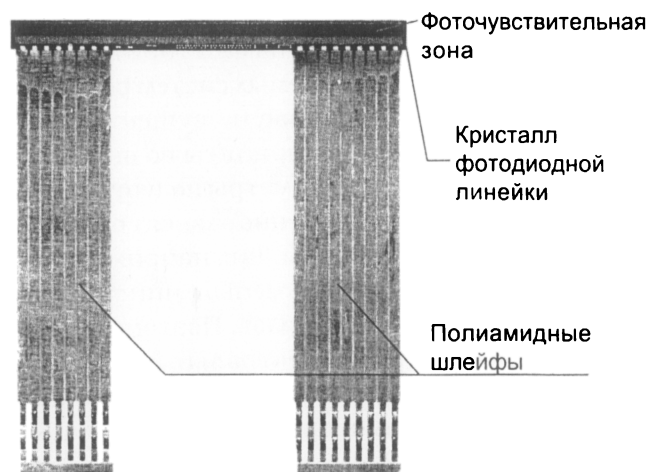


Рис. 2. Внешний вид кристалла фотодиодной линейки типа БЛПП-369 с полиамидными шлейфами

Основные типы многокристальных сборок линейных ТДИ показаны на рис. 3. Плоские многокристальные сборки (рис.3, а) используются для оснащения спектрографов с плоскими фокальными поверхностями и одномерной дисперсией, т.е. спектрографов, созданных для работы с фотопластинками (ИСП – 28, ИСП – 30, ДФС – 8,

ДФС – 13, PGS – 2 и др.). В вогнутых многокристальных сборках (рис.3, б) отдельные линейки ТДИ расположены по линиям аппроксимации дуги отрезками, равными длине одиночного кристалла. Такие сборки предназначены для использования в спектрометрах с вогнутыми фокальными поверхностями и одномерной дисперсией взамен ранее используемых в них ФЭУ (МФС – 3 – 8; ДФС – 10; ДФС – 36; ДФС – 41; ДФС – 44; ДФС – 51; ДФС – 458 и т.п.). Многострочные многокри-

стальные сборки (рис.3, в) предназначены для регистрации спектров в спектрографах со скрещенной дисперсией. Линейки ТДИ размещены в несколько рядов (строк) таким образом, чтобы обеспечить регистрацию каждого из порядков спектра. При этом кристаллы располагаются в направлении дисперсии дифракционной решетки. Такие сборки имеют выпуклость в горизонтальном направлении и используются в спектрографах со скрещенной дисперсией СТЭ-1.

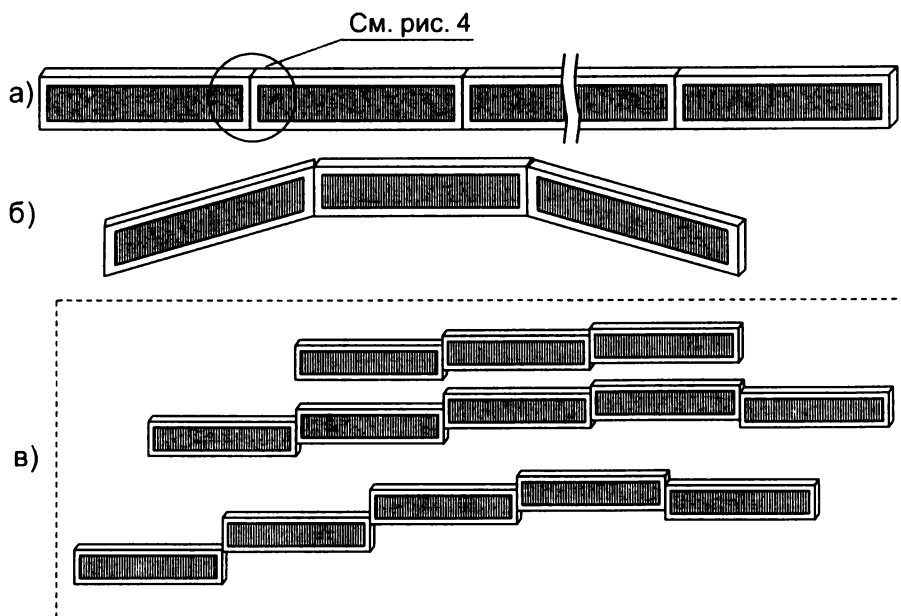


Рис. 3. Основные типы многокристальных сборок линейных ТДИ; а – плоские (5 и 8 кристаллов), б – вогнутые (5, 8, 10 и 12 кристаллов), в – многострочные (13 кристаллов)

Многолетний опыт применения многокристальных сборок подтвердил правильность выбранных технических решений, которые в настоящее время получили дальнейшее развитие. Корпус наполнен инертным газом с избыточным давлением и в него введены датчик давления, дополнительный датчик температуры для контроля перегрева корпуса, а также энергонезависимая память для хранения информации о сборке (тип кристаллов, их количество, заводской номер и т.д.). Кроме того, разработан одиночный

полиамидный шлейф для разъемного соединения каждого из кристаллов с коммутационной платой. Это не только существенно облегчило установку кристаллов по дуге и в несколько строк, но и позволило создать сборки без зазоров между линейками детекторов (с «перехлестом») и двухстрочные сборки для решения специальных задач АЭС анализа (например, для одновременной регистрации двух спектров). Варианты стыковки кристаллов ТДИ в многокристальных сборках показаны на рис.4.

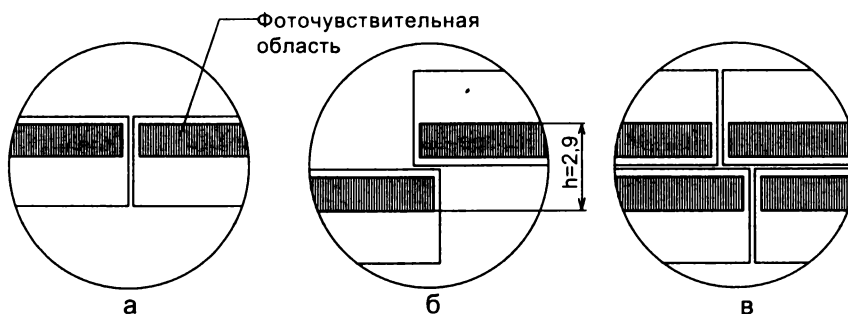


Рис. 4. Варианты стыковки кристаллов ТДИ в многокристальных сборках: а – с зазорами 0,7 мм между фоточувствительными областями, б – без зазоров (с «перехлестом» фоточувствительных областей), в – двухстрочные

Параметры многокристалльных сборок для различных спектральных приборов приведены в табл. 1. Можно видеть, что радиус поверхности установки кристаллов в сборках изменяется от вогнутого +375 мм до выпуклого -872 мм, а количество кристаллов – от 1 до 24. Кроме того, из таблицы следует (см. последний столбец), что для

регистрации областей спектра, необходимых для АЭС анализа, в приборах можно применять более одной сборки с различным количеством кристаллов. Так, например, в спектрометре Гранд (ВМК-Оптоэлектроника) применяются две сборки с 12 и 5 или двухстрочные с 24 и 10 кристаллами.

Таблица 1

Параметры многокристалльных сборок для различных спектральных приборов.

Оптическая система спектрального прибора	Наименование спектрального прибора	Радиус многокристалльной сборки, мм	Количество линеек типа БЛПП-369 в сборках с зазорами и без зазоров *
Призменная	ИСП-28, 30	-	5
Черни-Тернера	ДФС-8	-	5
	ДФС-13	-	8
	PGS-2	-	8
	SpectroLab	+375	12
Пашена-Рунге	Atomcomp/ICAP	+375	12
	Гранд	+500	12+5
	BIARD	+500	12
	МФС-3,4,5,6,7,8	+500	8 или 12
	ДФС-41,51	+500	12 или 12+1
	ДФС-458	+520	10
	ДФС-44	+750	12 или 12+1
	ДФС-36	+1000	12 или 12+1
Со скрещенной дисперсией	СТЭ-1	-872	13
* – В двухстрочных сборках количество линеек удваивается.			

В табл. 2 приведены основные характеристики многокристалльных сборок в сравнении с характеристиками сборок линейных ТДИ других производителей. Можно видеть, что многокристалльные сборки, применяемые в составе анализатора МАЭС, имеют на порядок больший динамический диапазон выходного сигнала фотоячейки и в пять раз больший сбор фотонов за счет уве-

личенной высоты фотоячейки, что в совокупности с охлаждением и стабилизацией температуры позволяют проводить высококачественное фотоэлектрическое преобразование оптического спектра в цифровую форму. Стабилизация осуществляется при определенной температуре в интервале от -5 до +20 °С в зависимости от требований решаемой задачи (типичная +15 °С).

Таблица 2

Основные характеристики сборок линейных ТДИ для стационарных спектрометров.

Название прибора	Анализатор МАЭС	Фотоэлектронная кассета	SKCCD	Фотоэлектронная кассета	ДФС-461	Ciros
1	2	3	4	5	6	7
Производитель	ООО «ВМК-Оптоэлектроника», г.Новосибирск	ООО «Морс», г.Троицк Московской обл.	НПП «Славна», г.Заречный, Свердловской области	ЗАО «Спектральная лаборатория», г.Санкт-Петербург	ЦКБ «Фотон», г.Казань	Spectro Analytical Instruments, Kleve, Германия
Тип ТДИ, его производитель	Фотодиодная линейка БЛПП-369, ВМК-Оптоэлектроника	Линейки ПЗС ILX511, Sony; TCD1304AP, Toshiba	Линейка ПЗС ILX511, Sony	Линейка ПЗС TCD1304AP, Toshiba	Линейка ПЗС ILX526A, Sony	Линейка ПЗС *, Sony

Окончание табл. 2

1	2	3	4	5	6	7
Динамический диапазон	10 <sup>4</sup>	10 <sup>3</sup>	10 <sup>3</sup>	10 <sup>3</sup>	10 <sup>3</sup>	*
Рабочий диапазон длин волн, нм	160-1100	180-950	170-960	200-950	230-460	125-770
Количество фотоячеек ТДИ	2580	2048 3648	2048	3648	3000	2048
Шаг фотоячеек, мкм	12,5	14	14	8	7	14
Высота фотоячеек, мм	1;	0,2	0,2;	0,2	0,2;	*
Количество линеек в сборке	До 24	До 12	До 20	До 8	До 15	22
Размер «мертвых» зон, мм; метод его уменьшения	0; смещением линеек по вертикали (см. рис. 4, б)	0; разводкой участков спектра зеркалами	0,15; разводкой участков спектра зеркалами	1; разводкой участков спектра зеркалами	*	0; разводкой участков спектра зеркалами
Рабочая температура, °С	-5 ÷ +20	без охлаждения	без охлаждения	без охлаждения	без охлаждения	+17
* – нет информации.						

Обратим внимание на различие методов уменьшения размеров «мертвых» зон. В многокристалльных сборках анализатора МАЭС это достигается смещением линеек по вертикали с «перехлестом» фоточувствительных областей (рис. 4, б), а в сборках других производителей применяется разводка участков спектра зеркалами [1].

Таким образом, разработана технология изготовления многокристалльных сборок твердотельных детекторов излучения, которые достигают размеров 40 см и более. При этом шаг фотодиодной структуры составляет 12,5 мкм. динамичес-

кий диапазон отдельных фотоприемников – 10<sup>4</sup>, а область спектральной чувствительности детекторов – 160 - 1100 нм. Многокристалльные сборки характеризуются высокой стабильностью фотоэлектрических и геометрических параметров, что достигается за счет стабилизации их температуры. Они пригодны для решения большинства задач атомно-эмиссионного спектрального анализа. Более двухсот сборок (в составе анализаторов МАЭС) используются в настоящее время практически со всеми типами известных спектрографов и квантометров в России и за рубежом.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Картер Д. Spectro Ciroc – новое слово в методе оптической эмиссионной спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой // Аналитика и контроль. 2003, Т. 7, № 2, С.112-119.
2. Лившиц А.М. Разработка спектральной аппаратуры на базе приборов с зарядовой связью / А.М.Лившиц, А.В.Пелезнев // Оптика и спектроскопия. 1994. Т.76, №2. С.363-368.
3. Лабусов В.А. Анализаторы МАЭС и их использование в качестве систем регистрации и обработки атомно-эмиссионных спектров / В.А.Лабусов, В.И.Попов, А.Н.Путьмаков и др. // Аналитика и контроль. 2005. Т.9, № 2. С.110-115.
4. Заксас Б.И. Многоканальный анализатор атомно-эмиссионных спектров / Б.И.Заксас, А.Б.Корякин, В.А.Лабусов и др. // Завод. лаб. 1994. Т.60, № 9. С.20-22.

\* \* \* \* \*

**LARGE MULTICHANNEL SOLID-STATE DETECTORS FOR ATOMIC-EMISSION SPECTROMETRY**  
V.A. Labusov, V.I. Popov, A.V. Behterev, A.N. Putmakov and A.S. Pak

*Development results on large multichannel solid-state detectors widely used for atomic-emission spectrometry as part of MAES analyzer are presented. Special multichannel photodiode arrays and multi-array assemblage production technology were designed. Array crystals in assemblage are placed according to optical spectra focal surface and cooled for stabilizing photoelectrical parameters. Photodiodes arrays characteristics and multi-array assemblages main types and parameters for different spectrometers are presented.*